

Таким образом, по результатам проведенного исследования можно рекомендовать для использования в процессе параметрического синтеза ГОМТ методы Хука-Дживса, Розенброка, Пауэлла, а также с минимальной подстройкой метод Нелдера-Мида. Однако при этом в процессе параметрического синтеза ГОМТ по критерию максимального среднеинтегрального КПД должен учитываться рабочий объем гидромашин.

Вторым важнейшим выводом на основе проведенного исследования является вывод о том, что разные методы оптимизации в процессе параметрического синтеза ГОМТ могут приводить к разным собственным векторам конструктивных параметров. Это означает, что заданная РХ ГОМТ может быть реализована не одним вектором, а некоторым множеством собственных векторов конструктивных параметров. В этом смысле конструктор получает более широкие возможности для конструктивной реализации кинематической схемы разрабатываемой трансмиссии.

**Список литературы:** 1. Автоматизированное управление гидрообъемными трансмиссиями и механизмами поворота гусеничных машин: Монография / Е.Е. Александров, М.Д. Борисюк, Я.В. Грита, В.А. Кононенко. – Харьков: ХГПУ, 1995. – 176 с. 2. Александров Е.Е., Самородов В.Б. Проблемы многокритериальной оптимизации трансмиссий транспортных средств // В кн.: "Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века", т.1. – Донецк. – 1999. – С. 26 – 29. 3. Г. Реклейтис, А.Рейвиндран, К.Рэсдел. Оптимизация в технике. Кн. 1. Изд. "Мир", Москва 1986. 4. Динамика транспортно-тяговых колесных и гусеничных транспортных машин / Александров Е.Е., Лебедев А.Т., Самородов В.Б. и др.-Харьков:ХГАДТУ, 2001. – 642 с. 5. Объемные гидромеханические передачи: Расчет и конструирование / О.М. Бабаев, Л.И. Игнатов, Е.С. Кисточкин и др.:–Л.: Машиностроение, 1987.– 256 с. 6. Самородов В.Б. Алгоритм оптимизации параметров гидрообъемно-механических трансмиссий транспортных средств. // Прочностные динамические характеристики машин и конструкций, Пермь, ППИ, 1985. – С. 59 – 63. 7. Самородов В.Б., Самородов В.Б. Постановка задачи параметрического синтеза гидрообъемно-механических трансмиссий для транспортных средств, выполняющих относительно стабильные технологические процессы. – Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2003. – № 1. С.112-118. 8. Самородов В.Б. Алгоритм оптимизации передаточных отношений механической ступенчатой трансмиссии по критерию наилучшей тяговой динамики гусеничной машины //Вісник ХДПУ. Збірник наукових праць.– Харків: ХДПУ.– 1999.–Вип 36. – С.135-140. 9. Самородов В.Б., Гужва В.А., Самородов В.Б. Метод симплекса на «жале» как модификация оптимизационных методов прямого поиска Спендли-Хекста-Химсворта и Нелдера-Мида. – Вісник НТУ «ХПІ» 36. наук. пр. Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків: НТУ «ХПІ». –2002. № 13. С. 79-86. 10. Химмельбау Д.М. Прикладное нелинейное программирование. – М.: Мир, 1975.

Поступила в редколлегию 16.11.06УДК 658.012.011.56

**В. М. ЛЕВЫКИН**, д-р техн. наук, **М. С. КУДРЯВЦЕВА**, аспирант  
ХНУРЭ

## **МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВАРИАНТОВ РЕШЕНИЙ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

В роботі з застосуванням теорії нечітких множин розроблено моделі оцінок використання методів для діагностики порушень роботи трансформаторного обладнання, які дають можливість

оператору здійснити оцінку стану трансформаторного обладнання. З використанням механізму нечіткого виводу виконана процедура реалізації вибору методів діагностики порушень в основних елементах трансформаторного обладнання. Варіанти рішень, наведені з оцінками переваг і недоліків кожного методу, дозволяють співробітникам функціональних служб прийняти оптимальне рішення відносно доцільності застосування конкретного методу діагностики технологічного порушення.

## **Введение**

Анализ технологических нарушений электроэнергетического оборудования напряжением 35 кВ и выше свидетельствует о постоянном росте количества повреждений. За период с 1998г. по 2005г. 65 % технологических нарушений электроэнергетического оборудования связано с повреждениями силовых, измерительных трансформаторов и шунтирующих реакторов, причем 20 % из них – из-за неправильных действий оперативного персонала и некачественно выполненного ремонта.

Изучение эксплуатационной документации электроэнергетического оборудования сотрудниками службы противоаварийной работы и технического надзора предприятий НЭК «Укрэнерго» показывает, что в большинстве случаев оборудование эксплуатируется с характеристиками, имеющими недопустимые отклонения от нормативных значений. При этом основными причинами повреждений оборудования выявлены: несвоевременное принятие мер по устранению дефектов, восстановлению характеристик и несоблюдение персоналом требований нормативно-технической документации [1].

## **Постановка задачи исследования**

Таким образом, получение оценки фактического состояния электроэнергетического оборудования по результатам диагностических измерений является сложной и актуальной задачей. Значительная часть оборудования выработала свой ресурс, но продолжает эксплуатироваться из-за недостатка финансовых средств на его замену. Соответственно, с каждым годом увеличиваются затраты на проведение комплексных обследований и диагностики.

Данная проблема ставит задачу получения новых моделей разработки вариантов решений, направленных на предупреждение аварийных режимов трансформаторного оборудования.

В качестве математического аппарата решения данной задачи предлагается использовать теорию нечеткой логики (математической формализации нечеткой информации). Целесообразность ее применения объясняется тем, что использование конкретного математического аппарата (интервального анализа, статистических методов, теории игр, детерминированных моделей) для принятия решений в условиях неопределенности позволяет отразить в модели только отдельные виды данных и приводит к безвозвратной потере информации других типов.

## **Анализ достижений и публикаций, в которых предложено решение данной проблемы**

Для анализа данной проблемы рассмотрена существующая «Экспертная система контроля и оценки состояния и условий эксплуатации трансформаторов» [2, 3].

В основу данной экспертной системы положен принцип системного подхода: на первом этапе используется метод декомпозиции общей проблемы оценки надежности трансформаторного оборудования по двенадцати основным направлениям, включающим в себя анализ полного спектра условий его эксплуатации и ремонта. На втором этапе все основные направления дополнительно декомпозированы на десять локальных подуровней. В результате такого подхода сформирована матрица, охватывающая сто двадцать локальных факторов, влияющих на состояние организации обеспечения надежности трансформаторов.

Экспертная система предполагает по каждому обследуемому направлению произвести оценку характеристик оборудования по шкале от 0 до 1,0. Таким образом, общая оценка состоит из части, в которой осуществляется проверка полноты выполнения нормативно-технической и рабочей документации, и части, в которой осуществляется сравнительная оценка экспертами состояния трансформаторов. Поэтому такая методика позволяет в достаточной степени объективно оценить ситуацию на энергопредприятии и обеспечить выработку решений и принятие мер, направленных на повышение уровня эксплуатации и надежности трансформаторов.

## **Выделение нерешенных вопросов общей проблемы, которым посвящена данная статья**

Однако, данная система предлагает только субъективную, хотя и комплексную, оценку состояния трансформаторного оборудования. В тоже время в ней не рассматривается целесообразность применения методов и средств диагностики и устранения выявленных технологических нарушений.

## **Изложение основного материала исследования**

Структурная модель нарушений трансформаторного оборудования и методов их диагностики представлена на рис. 1.

Данная структурная модель описывает взаимосвязь основных элементов трансформаторного оборудования, в которых, согласно анализу и исследованию технологических нарушений, наиболее часто происходят нарушения (вводы, обмотка, элементы магнитопровода, изоляция, контакты, маслонасос, устройство регулирования напряжения под нагрузкой (РПН), с альтернативными методами диагностики каждого нарушения (метод анализа трансформаторного масла, метод тепловизионного контроля, метод измерения частичных разрядов, метод электромагнитной локации зон

разрядных явлений, метод измерения изоляционных характеристик, метод вибродиагностики, метод контроля путем осциллографирования, диагностика с использованием комплекса программных и аппаратных средств).

Рассматриваемая задача диагностики трансформаторного оборудования предполагает полную информированность лица принимающего решение, поэтому вся информация о режимах функционирования трансформаторного оборудования, эффективности и предпочтительности одних методов его диагностики перед другими, о риске применения каждого метода должна быть преобразована к единой форме и представлена в виде функций принадлежности. Применение теории нечетких множеств позволяет свести воедино всю имеющуюся неоднородную информацию за счет введения понятия нечеткого множества как совокупности элементов, которые могут соответствовать этому множеству со степенью принадлежности от 0 до 1. Причем 0 обозначает абсолютную непринадлежность, а 1 – абсолютную принадлежность множеству [4, 5].

Пусть  $A$  – множество нарушений основных элементов трансформаторного оборудования:

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_k, \dots, a_n\}, \quad (1)$$

Существует множество альтернативных методов  $B$  диагностики каждого нарушения  $a_k$ :

$$B = \{b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_m\}, \quad (2)$$

Применение каждого метода для диагностики нарушения  $a_k$  можно оценить с помощью различных критериев  $C_k$ . Тогда для каждого критерия  $C_k$  может быть рассмотрено нечеткое множество [6]:

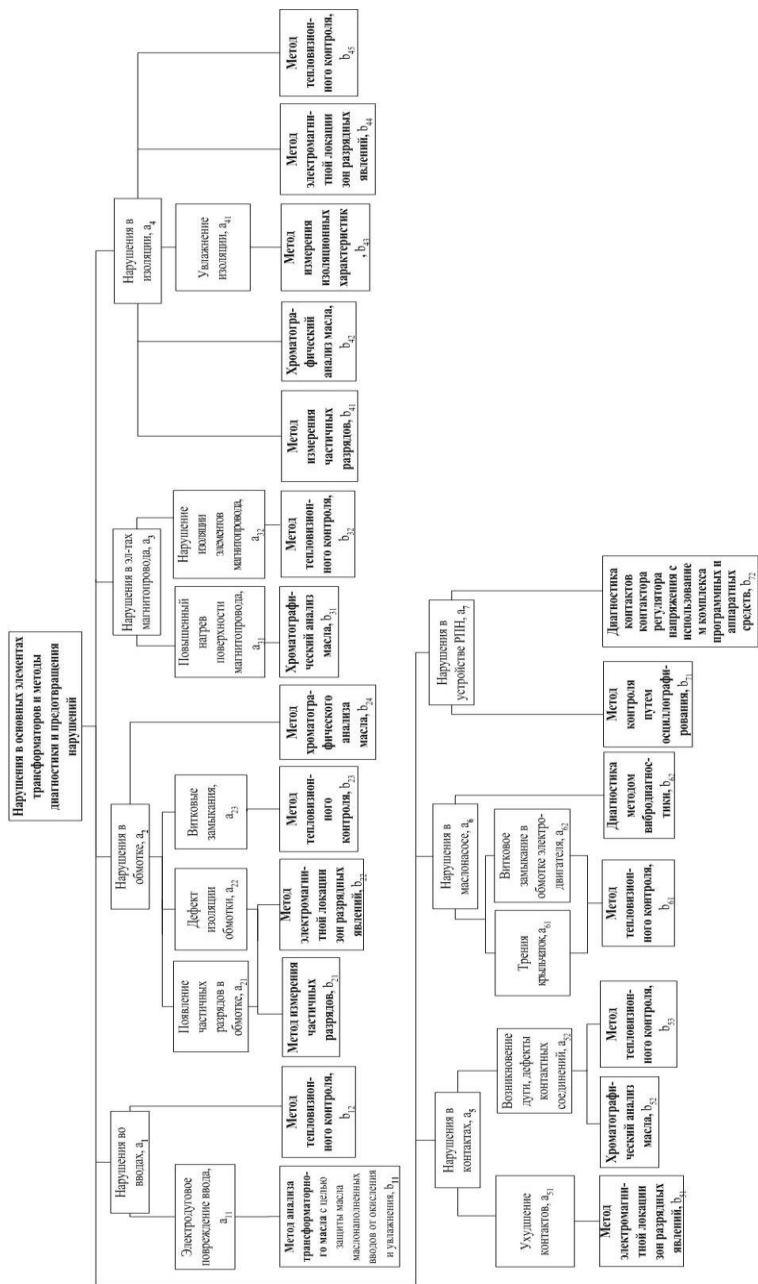


Рис. 1. Структурная модель нарушений трансформаторного оборудования и методов их диагностики

$$C_k = \{\mu_c(b_1)/b_1, \mu_c(b_2)/b_2, \dots, \mu_c(b_i)/b_i, \dots, \mu_c(b_m)/b_m\}, \quad (3)$$

где  $\mu_c(b_i)$  – оценка метода  $b_i$  по критерию  $C_k$ , характеризующая степень соответствия каждого метода понятию, определенному критерием  $C_k$  (функция принадлежности, принимающая значения в некотором вполне упорядоченном множестве:  $\mu_c(b_i) \in [0,1]$ ).

Прежде всего, экспертам предлагается оценивать максимальные и минимальные возможные значения критериев методов в натуральных показателях, после чего эти значения переводятся в интервал  $[0, 1]$  выражением:

$$u_c = \frac{u_c - u_{\min}}{u_{\max} - u_{\min}}, \quad (4)$$

где:  $u_c$ ,  $u_{\min}$ ,  $u_{\max}$  – соответственно оценка применения метода, ее минимальное и максимальное значения, определенные экспертами.

Тогда с учетом (3-4) модель оценки применения методов для диагностики нарушений работы трансформаторного оборудования  $L$  можно представить в виде следующей системы нечетких множеств:

$$L = \begin{cases} C_{a1} = \{\mu_c(b_{11})/b_{11}, \mu_c(b_{12})/b_{12}\}, \\ C_{a2} = \{\mu_c(b_{21})/b_{21}, \mu_c(b_{22})/b_{22}, \mu_c(b_{23})/b_{23}, \mu_c(b_{24})/b_{24}\}, \\ C_{a3} = \{\mu_c(b_{31})/b_{31}, \mu_c(b_{32})/b_{32}\}, \\ C_{a4} = \{\mu_c(b_{41})/b_{41}, \mu_c(b_{42})/b_{42}, \dots, \mu_c(b_{45})/b_{45}\}, \\ C_{a5} = \{\mu_c(b_{51})/b_{51}, \mu_c(b_{52})/b_{52}, \mu_c(b_{53})/b_{53}\}, \\ C_{a6} = \{\mu_c(b_{61})/b_{61}, \mu_c(b_{62})/b_{62}\}, \\ C_{a7} = \{\mu_c(b_{71})/b_{71}, \mu_c(b_{72})/b_{72}\}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $b_{11}$  – метод анализа трансформаторного масла, обеспечивающий контроль масла маслонеполненных вводов от окисления и увлажнения;

$b_{12}$ ,  $b_{23}$ ,  $b_{32}$ ,  $b_{45}$ ,  $b_{53}$ ,  $b_{61}$  – метод тепловизионного контроля элементов трансформаторного оборудования (соответственно вводов, обмотки, магнитопровода, изоляции, контактов, маслонасоса);

$b_{21}$ ,  $b_{41}$  – метод измерения частичных разрядов элементов трансформаторного оборудования (соответственно обмотки, изоляции);

$b_{22}$ ,  $b_{44}$ ,  $b_{51}$  – метод электромагнитной локализации зон разрядных явлений элементов трансформаторного оборудования (соответственно обмотки, изоляции, контактов);

$b_{24}$ ,  $b_{31}$ ,  $b_{42}$ ,  $b_{52}$  – метод хроматографического анализа масла для определения нарушений в элементах трансформаторного оборудования (соответственно обмотки, магнитопровода, изоляции, контактов);

$b_{43}$  – метод измерения изоляционных характеристик;

$b_{62}$  – метод вибродиагностики маслососа;

$b_{71}$  – метод контроля путем осциллографирования устройства РПН;

$b_{72}$  – метод диагностики контактов контактора регулятора напряжения с использованием комплекса программных и аппаратных средств.

Для предотвращения аварийных режимов трансформаторного оборудования, разработан алгоритм действий оператора при выборе методов диагностики трансформаторного оборудования. Данный алгоритм представлен на рис. 2.

Для разработки вариантов решений по предотвращению аварийных режимов трансформаторного оборудования рассмотрим механизм нечеткого вывода на основании композиции двух нечетких отношений, в котором композиционное правило вывода задает закон реализации нечеткой модели выбора методов предотвращения нарушений трансформаторного оборудования.

Пусть  $x_i, z_j$  – переменные, между которыми существуют нечеткие причинные отношения  $r_{ij} = x_i \rightarrow z_j$ , которые можно представить в виде некоторой матрицы экспертных оценок  $R$  соответствия применяемых методов конкретному нарушению с элементами  $r_{ij}, r_{ij} \in [0,1]$ . Конкретные входы (нарушения в основных элементах оборудования)  $A$  между  $X$  и  $Y$  ( $X \times Y \rightarrow [0,1]$ ) и выходы (методы диагностики)  $B$  между  $Y$  и  $Z$  ( $Y \times Z \rightarrow [0,1]$ ) можно рассматривать как нечеткие множества на пространствах  $X$  и  $Z$  [7, 8].

Отношения этих множеств можно обозначить:

$$B = A \circ R, \quad (6)$$

где « $\circ$ » – оператор композиции нечетких множеств.

Тогда для процедуры нечеткого вывода функцию принадлежности можно представить:

$$\mu(A \circ R)_{(x,z)} = \sup_{y \in Y} [\mu^A_{(x,y)} \wedge \mu^R_{(y,z)}], \quad (7)$$

Данная операция выполняется как обычное произведение матриц, в которых операция поэлементного умножения заменяется на нахождение минимума, а суммирование – на нахождение максимума.



Рис. 2. Алгоритм действий оператора при выборе методов диагностики трансформаторного оборудования

Тогда с учетом (6-7) модель процедуры реализации выбора методов предотвращения нарушений трансформаторного оборудования может быть представлена в виде следующей системы Т:



$$T = \begin{cases} [b_{11} & b_{12}] = [a_1 & a_{11}] \circ R_1, \\ [b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24}] = [a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_2] \circ R_2, \\ [b_{31} & b_{32}] = [a_{31} & a_{32}] \circ R_3, \\ [b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} & b_{45}] = [a_4 & a_4 & a_{41} & a_4 & a_4] \circ R_4, \\ [b_{51} & b_{52} & b_{53}] = [a_{51} & a_{52} & a_{52}] \circ R_5, \\ [b_{611} & b_{612} & b_{62}] = [a_{61} & a_{62} & a_6] \circ R_6, \\ [b_{71} & b_{72}] = [a_7 & a_7] \circ R_7, \end{cases} \quad (8)$$

где  $R_t$  – матрицы экспертных оценок эффективности методов диагностики нарушений трансформаторного оборудования. Матрица определяется сотрудниками функциональных служб исходя из оценок критериев применения каждого метода для диагностики нарушений.

$a_{11}$  – электродуговое повреждение ввода;  $a_{21}$  – появление частичных разрядов в обмотке;  $a_{22}$  – дефект изоляции обмотки;  $a_{23}$  – витковые замыкания;  $a_{31}$  – повышенный нагрев поверхности магнитопровода;  $a_{32}$  – нарушение изоляции элементов магнитопровода;  $a_{41}$  – увлажнение изоляции;  $a_{51}$  – ухудшение контактов;  $a_{52}$  – возникновение дуги, дефекты контактных соединений;  $a_{61}$  – трения крыльчаток;  $a_{62}$  – витковые замыкания в обмотке электродвигателя.

В качестве примера рассмотрим модель процедуры реализации выбора методов предотвращения нарушений в обмотке ( $a_2$ ). Для диагностики нарушений в обмотке могут использоваться метод измерения частичных разрядов, метод электромагнитной локализации зон разрядных явлений, метод тепловизионного контроля, хроматографический анализ масла. С учетом (6) данная модель может быть представлена следующими матрицами:

$$[b_{21} \quad b_{22} \quad b_{23} \quad b_{24}] = [a_{21} \quad a_{22} \quad a_{23} \quad a_2] \circ \begin{bmatrix} 0,5 & 0,6 & 0,9 & 0 \\ 0,8 & 0,6 & 0,8 & 0 \\ 0,7 & 0,5 & 0,8 & 0 \\ 0,5 & 0,7 & 0,9 & 0 \end{bmatrix},$$

Для определения оценок методов транспонируем матрицы:

$$\begin{bmatrix} b_{21} \\ b_{22} \\ b_{23} \\ b_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,5 & 0,8 & 0,7 & 0,5 \\ 0,6 & 0,6 & 0,5 & 0,7 \\ 0,9 & 0,8 & 0,8 & 0,9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} a_{21} \\ a_{22} \\ a_{23} \\ a_2 \end{bmatrix},$$

С учетом выражения (7), используя max-min композицию для метода  $b_{21}$  имеем:

$$b_{21} = (0,5 \wedge a_{21}) \vee (0,8 \wedge a_{22}) \vee (0,7 \wedge a_{23}) \vee (0,5 \wedge a_2), \quad (9)$$

Предположим, что выявленное нарушение в обмотке  $a_{21}$ ,  $a_{21}=1$ , а остальные нарушения отсутствуют, т.е.  $a_{22}=0$ ,  $a_{23}=0$ ,  $a_2=0$ . Тогда значение применимости метода  $b_{21}=0,5$ . При выявленном нарушении  $a_{22}=1$  и отсутствии нарушений в других элементах значение применимости метода  $b_{21}=0,8$ .

Аналогично с учетом выражения (7) получим значения эффективности использования методов  $b_{22}$ ,  $b_{23}$ ,  $b_{24}$ :

$$b_{22} = (0,6 \wedge a_{21}) \vee (0,6 \wedge a_{22}) \vee (0,5 \wedge a_{23}) \vee (0,7 \wedge a_2),$$

при  $a_{21}=1$ ,  $a_{22}=0$ ,  $a_{23}=0$ ,  $a_2=0$ , оценка метода  $b_{22}=0,6$ ; при  $a_{22}=1$  оценка метода  $b_{22}=0,6$ ;

$$b_{23} = (0,9 \wedge a_{21}) \vee (0,8 \wedge a_{22}) \vee (0,8 \wedge a_{23}) \vee (0,9 \wedge a_2),$$

при  $a_{23}=1$ ,  $a_{21}=0$ ,  $a_{22}=0$ ,  $a_2=0$ , оценка метода  $b_{23}=0,8$ ;

$$b_{24} = (0 \wedge a_{21}) \vee (0 \wedge a_{22}) \vee (0 \wedge a_{23}) \vee (0 \wedge a_2),$$

при  $a_2=1$ ,  $a_{21}=0$ ,  $a_{22}=0$ ,  $a_{23}=0$ , оценка метода  $b_{24}=0$

Таким образом, при появлении частичных разрядов между витками обмотки трансформатора использование метода электромагнитной локализации зон разрядных явлений эффективнее, чем использование метода измерений частичных разрядов (значения показателей методов 0,6 и 0,5). При дефекте изоляции обмотки метод измерений частичных разрядов эффективнее метода электромагнитной локализации зон разрядных явлений (соответственно значения показателей методов 0,8 и 0,6). При витковых замыканиях достаточно эффективен метод тепловизионного контроля (значение показателя метода 0,8). Метод хроматографического анализа масла для определения нарушений в обмотке, по оценкам экспертов, полностью неэффективен (значение показателя метода 0).

Оператор, анализируя полученные варианты соответствия методов диагностики конкретным нарушениям, принимает решение о целесообразности применения методов диагностики. При необходимости он может добавлять новые методы диагностики оборудования и вводить соответствующие экспертные оценки.

### **Выводы из данного исследования**

В работе с применением теории нечетких множеств разработаны модели оценок применения методов для диагностики нарушений работы трансформаторного оборудования, которые дают возможность оператору

осуществить оценку состояния трансформаторного оборудования, что обеспечивает проведение работ по предотвращению нарушений в основных элементах трансформаторного оборудования.

С использованием механизма нечеткого вывода выполнена реализация процедуры выбора методов диагностики нарушений в основных элементах трансформаторного оборудования. Варианты решений, представленные с оценками преимуществ и недостатков каждого метода, позволяют сотрудникам функциональных служб принять оптимальное решение относительно целесообразности применения конкретного метода диагностики технологического нарушения.

Преимуществом разработанных моделей является их универсальность, т.к. они не зависят от формы представления нарушений в виде конкретных числовых значений или некоторой неопределённости, описываемой нечётким множеством.

**Список литературы:** 1 Огляд технологічних порушень в мережах НЕК «Укренерго» за 2005 рік. – К., 2006. – 30с. 2 Башилов А.А., Еремеев А.П. Экспертные системы поддержки принятия решений в энергетике. – М.: МЭИ, 1994. – 250с. 3 РД 153-34.3-46.304-00 Положение об экспертной системе контроля и оценки состояния и условий эксплуатации силовых трансформаторов, шунтирующих реакторов, измерительных трансформаторов тока и напряжения. – М.: Департамент генеральной инспекции по эксплуатации электрических станций и сетей РАО "ЕЭС России", 2000. – 17с. 4 Новак В., Перфильева И. и др. Математические принципы нечеткой логики. – М.: Физматлит, 2006. – 352с. 5 Zimmermann H.-J. Fuzzy Set Theory and Its Applications. – Kluwer: Dordrecht, 1991. – 315p. 6 Усков А.А., Кузьмин А.В. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика. – М.: Горячая линия-Телеком, 2004. – 143с. 7 Борисов А.Н., Крумберг О.А., Федоров И.П. Принятие решений на основе нечетких моделей: Примеры использования. – Рига: Зинатне, 1990. – 184 с. 8 Батыршин И.З. Основные операции нечеткой логики и их обобщения. – Казань: Отечество, 2001. – 102с.

*Поступила в редколлегию 01.11.06*

**УДК 656.02**

**Є. В. НАГОРНИЙ**, д-р. техн. наук, професор, ХНАДУ  
**О. В. ДОРОХОВ**, канд. техн. наук, доцент, ХНАДУ

## **ПОСЛІДОВНІСТЬ ТА ЗАСОБИ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМНИХ ЗАДАЧ УДОСКОНАЛЕННЯ ТРАНСПОРТНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Розроблено схеми опрацювання проблемних ситуацій та математичного моделювання логістичних системних задач транспортних технологій. Запропоновано застосування системного підходу до взаємозв'язків суб'єктів, задач транспортного обслуговування, методів їх вирішення.

**Вступ**

На сучасному етапі розвитку конкурентного ринку транспортних послуг в Україні зростає необхідність методологічно та науково обґрунтованого